

## Список использованных источников

1. Тихенко, В. С. Реалізація національних та наднаціональних проектів збирання та переробки побутових відходів в Україні [Текст] / В. С. Тихенко // Вісник Дніпропетровського університету: науковий журнал, серія: Економіка – Дніпропетровськ, 2014.- Т. 22. № 10/1. Вип. 8 (2). – с.84-88.
2. Vermeer P.A., Neher H.P. (1999): A Soft Soil Model that Accounts for Creep. Proc. Int. Symp. "Beyond 2000 in Computational Geotechnics", Amsterdam, pp. 249-261, Balkema, Rotterdam.
3. Rangeard, D., Zentar, R. & Abriak, N-E. (2004) Influence of soil model on the analysis of pressuremeter test. In proceedings of Int. Conf. on Numer. Models in Geomech., NUMOG IX, 699-705
4. Ремез, Н.С. Напряженно-деформированное состояние полигонов твердых бытовых отходов с учетом слоистого грунтового основания [Текст] / Н.С. Ремез, Т.А. Осипова // «Вісник НТУУ «КПІ»: зб. наук. праць. – К.: ВПК «Політехніка», 2015. – Вип. 28. – С. 11 – 17. – (Серія «Гірництво»).

*Статья поступила в редакцию 14.03.2016 г.*

УДК 624.159.1

**А.М. Самедов**, д. т. н., проф., **В.Г. Кравець**, д. т. н., проф., **Д.В. Ткач** асп. (НТУУ «КПИ»)

## ОТЖАТИЕ ПОРОВОЙ ВОДЫ, УПЛОТНЕНИЕ, КОНСОЛИДАЦИЯ И ПОЛЗУЧЕСТЬ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ГРУНТОВ ПРИ СЖАТИИ

**A. Samedov, V. Kravets, D. Tkach** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)

## WRUNG PORE WATER, SEALS, CONSOLIDATION AND CREEP IN SATURATED SOIL UNDER COMPRESSION

Рассмотрены проблемы отжатия поровой воды, уплотнение, фильтрационная консолидация и ползучесть водонасыщенных грунтов при сжатии. В компрессионных испытаниях образцов из водонасыщенных глинистых грунтов после отжатия поровой воды получены коэффициенты относительной сжимаемости условно-мгновенного времени, после уплотнения и фильтрационной консолидации, и стабилизации деформаций. Определены прочностные и деформационные показатели после отжатия поровой воды и уплотнения. Предложены уравнения последовательной ползучести и определены входящие параметры на основе коэффициентов относительной сжимаемости после стабилизации деформаций, фильтрационной консолидации.

**Ключевые слова:** отжатие; поровая вода; нейтральные давления; эффективные давления; уплотнение; консолидация; наследственная ползучесть; скелет грунта;

*коэффициент относительной сжимаемости; компрессионные условия; водонасыщенные глинистые грунты.*

*Розглянуто проблеми віджимання парової води, ущільнення, фільтраційна консолідація і повзучість водонасичених ґрунтів при стисненні. У компресійних випробуваннях зразків з водонасичених глинистих ґрунтів після віджимання парової води отримані коефіцієнти відносної стисливості умовно-миттєвого часу, після ущільнення і фільтраційної консолідації, і стабілізації деформацій. Визначено міцність і деформаційні показники після віджимання парової води і ущільнення. Запропоновано рівняння послідовної повзучості і визначені входять параметри на основі коефіцієнтів відносної стисливості після стабілізації деформацій, фільтраційної консолідації.*

**Ключові слова:** віджимання; парова вода; нейтральні тиску; ефективні тиску; ущільнення; консолідація; спадкова повзучість; скелет ґрунту; коефіцієнт відносної стисливості; компресійні умови; водонасичені глинисті ґрунти.

*The problems squeezing pore water, seal, filtration consolidation and creep in compression-saturated soils. The compression tests on samples of water-saturated clay soils after squeezing pore water obtained coefficients relative compressibility conditional instant of time, after sealing and filtration consolidation and stabilization of the deformations. Determined the strength and deformation performance after squeezing pore water and seal. The equations and creep serial input parameters are defined based on the relative compressibility coefficients after stabilization of deformations filtration consolidation.*

**Keywords:** pressed; pore water; neutral pressure; effective pressure seal; consolidation; hereditary creep soil skeleton; the coefficient of relative compressibility; compression conditions; water-saturated clay soils.

**Вступление.** Проводимые ранее исследования, не рассматривали работу переувлажненных грунтов как основания подземного сооружения и его поведения с учетом длительного периода эксплуатации. Следовательно, исследование деформируемости данных грунтов, которая проходит во время длительного периода восприятия сжимающих нагрузок с учетом водонепроницаемости и ползучести, является актуальной задачей.

В литературе [1-6] приведены некоторые исследования консолидации и ползучести при сжатии. Однако результаты исследований в лабораторных и полевых условиях не приведены для описания процессов наследственной ползучести водонасыщенных грунтов.

**Цель работы.** Целью работы является изучение происходящих процессов в водонасыщенном глинистом грунте при нагружении и ступенчатом сжатии и описание процессов ползучести.

**Результаты исследований.** В грунтовом массиве имеются 5 видов воды: пар, гигроскопическая вода, пленочная, свободная и твердая вода (лед). Рассмотрим какие из этих вод в порах грунта движутся свободно. Пар – находится в порах между твердыми частицами и может двигаться от большего давления к меньшему. Гигроскопическая вода – в порах грунта находится в результате конденсации паровой воды и в песчаном грунте содержится в количестве до 1%, а в глинистом грунте до 17%. Гигроскопическая вода, будучи в порах грунта в жидком состоянии – неподвижна, а после перехода в парообразное состояние может двигаться в порах. Пленочная вода –

молекулярными силами притяжения закреплена на поверхности твердых частиц и под собственным весом в порах двигаться не может. Пленочная вода в трехфазном грунте с заземленным воздухом, в зависимости от степени влажности, может двигаться от большего его значения к меньшему. Гидравлическое давление не действует на пленочную воду, поэтому закономерность фильтрации пленочной воды отличается от закономерности фильтрации свободной воды. Твердые частицы грунта за счет силы молекулярного притяжения могут вокруг себя удерживать определенное количество пленочной воды (до максимальной молекулярной влажности  $w_m=2\div3\%$  - для песчаных,  $w_m=15\div18\%$  - для лессовидных суглинков и супесей,  $w_m=16\div17\%$  - для глинистых грунтов). Свободная вода – делится на гравитационную воду и капиллярную. Гравитационная вода под давлением больше атмосферного, может двигаться от большего давления к меньшему. Капиллярная вода под давлением меньше атмосферного, может двигаться от силы притяжения капилляров вертикально вверх, от собственной тяжести и силы притяжения вертикально вниз. Высота поднятия капиллярной воды зависит от диаметра капилляров ( $d_{\text{кап}}=0,005\text{мм}$  капиллярные силы притяжения достигают до 0,06 МПа,  $d_{\text{кап}}=0,0002\text{мм}$  эта сила доходит до 1,5 МПа). Твердая вода (лед) – в порах грунта может двигаться только после перехода в свободную воду.

При сжатии водонасыщенного грунта возникает два вида давления: нейтральное и эффективное. Нейтральным давлением называют давление, которое воспринимают поровые воды, а эффективным – воспринимаемое твердыми частицами, т.е. скелетом грунта. В водонасыщенном грунте, первыми появляются нейтральные давления в поровой воде. Коэффициент сжимаемости воды  $\beta_v=0,0000047 \text{ МПа}^{-1}=\text{const}$  очень мал, поэтому считается, что вода практически несжимаемая, а коэффициент сжимаемости грунта -  $m_0$  в 1000 раз больше, чем  $\beta_v$ . Однако, учитывая, что давление от твердых частиц передается только через контактные точки, а площади контактных точек незначительны, поэтому коэффициент сжимаемости грунта в водонасыщенном состоянии  $m_0$  в 10 раз меньше  $\beta_v$ . Это значит, что в водонасыщенном грунте минеральные частицы являются также практически несжимаемыми. При этом сжатие водонасыщенного грунта приводит к отжатию поровой воды. Пory грунта частично освобождаются от отжатой воды, происходит предварительное уплотнение минерального скелета за счет уменьшения пористости. Затем начинается процесс фильтрационной консолидации с дальнейшим уплотнением грунта. После прекращения консолидации уплотнения при постоянной нагрузке (например от сооружения), возникает явление ползучести минерального скелета грунта, т.е. реализуются сдвиговые деформации под действием касательных напряжений. Фактически наблюдаются деформации формоизменения.

Следует отметить, что процесс фильтрационной консолидации и наследственной ползучести скелета водонасыщенного грунта при сжатии в инженерной практике удобно наблюдать при ступенчатом нагружении образцов-близнецов, взятых их массива будущего основания сооружения. При

ступенчатом режиме нагружения можно учитывать больше факторов, чем при одноразовом нагружении, например, таких, как процесс упрочнения, разупрочнения, изменения вязкости образцов, уменьшения влажности, модуля деформации от ступени к ступени нагрузок.

Для описания процесса консолидации водонасыщенного глинистого грунта, с учетом отжатия воды из пор по всей высоте уплотняемого слоя грунта, принимаем модуль общей деформации грунта  $E_0$  с высотой слоя  $h$ , где  $h=h_1+h_2$ , где  $h_1$  – высота сжимаемого слоя при давлении  $\sigma_1$  во времени  $t_1$  длины пути фильтрации;  $h_2$  – высота несжимаемого слоя при давлении  $\sigma_1$  во времени  $t_1$ , т.е. длина пути без фильтрации во времени  $t_1$  и под давлением  $\sigma_1$ . Процесс консолидации водонасыщенного глинистого грунта описываем согласно модели Самедова-Ткача [6]. В этом случае запаздывание деформации будет обусловлено не столько ползучестью скелета грунта, а сколько длиной пути фильтрации толщины слоя  $h$ . Известно, что при упругих свойствах скелета период стабилизации фильтрационной консолидации пропорционален квадрату длины пути фильтрации или толщины уплотняемого слоя, т.е.  $t_1/t_2=(h_1/h_2)^2$ .

В случае малого значения  $h$ , т.е. в тонком слое водонасыщенного грунта, который уплотняется под нагрузкой  $\sigma_1$  фильтрационная консолидация отсутствует, происходит лишь отжатие поровой воды и уплотнение за счет уменьшения пористости (рис. 1).

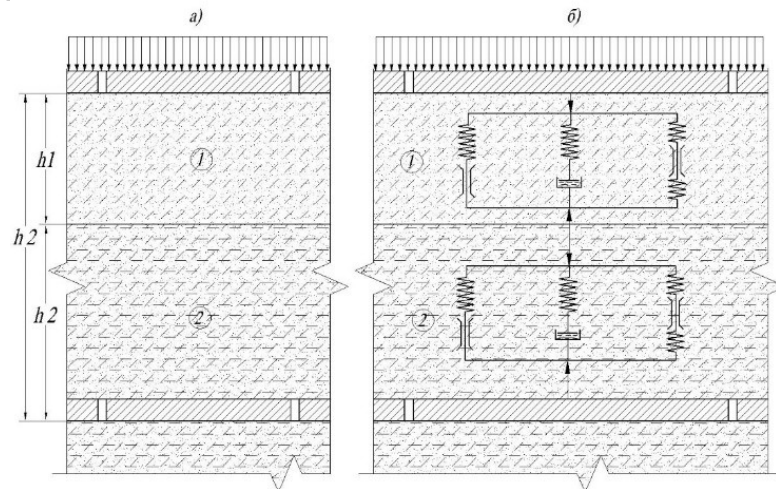


Рис. 1. Реологические модели «Самедова-Ткача» водонасыщенного глинистого грунта при консолидации в слое толщиной  $h$  с упруго-вязким скелетом и несжимаемой поровой водой; а) супесь слоем толщиной  $h$ ; б) реологическая схема работы грунта:

1 – грунт после отжатия поровой воды с  $W=0,25$  до  $W=0,1$  и уплотнения высотой  $h_1$ ; 2 – часть без отжатия поровой воды и без уплотнения по высоте  $h_2$  в природном состоянии  $W=0,25$  (в водонасыщенном виде)

На основании моделей, Самедова-Ткача, изображенной на рис.1, можно вывести уравнение одномерной консолидации с начальными граничными условиями. Эта пространственная модель строится путем использования

реологических свойств грунта при сдвиге (сдвиговых деформаций) с использованием касательных напряжений  $\tau$ , в виде  $\sigma_i(\tau)$ , модуля сдвига  $G_m$  и вязкости  $\eta$ . Для объемного деформирования необходимо заменить  $\tau$  на нормальные напряжения  $\sigma$ , модуль сдвига  $G_m$  заменить на модуль общей деформации  $E_0$ , вязкость  $\eta$  заменить на вязкость при объемном сжатии  $\eta_v$ . По теории наследственной ползучести Больцмана-Вольтера по условию сдвига:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \frac{\sigma_i(t)}{G_m} + \int_{\tau_1}^t K_\gamma(t, \tau) \dot{\sigma}_i(\tau) d\tau \\ \varepsilon_v &= \frac{\sigma(t)}{K_m} + \int_{\tau_1}^t K_v(t, \tau) \dot{\sigma}_i(\tau) d\tau\end{aligned}\quad (1)$$

где  $G_m$ ,  $K_m$  – мгновенные модули сдвига и объема,  $K_v(t, \tau)$  – ядро ползучести, представляющее собой скорость сдвиговой деформации при единичном значении  $\sigma_i=1=\text{const}$ ,  $K_v(t, \tau)$  – ядро ползучести, представляющее собой скорость объемной деформации при единичном значении  $\sigma_i=1=\text{const}$ ,  $\varepsilon_i$ ,  $\varepsilon_v$  – деформация сдвига и объемная деформация.

Ядра ползучести не зависят от изменений времени  $t - \tau$ , т.к. в грунтовых средах инвариантность уравнений состояния в отношении изменения времени нарушается за счет уплотнения и изменения физических показателей грунта. Параметры уравнения становятся зависящими от времени явным образом и ядро ползучести уже не будет функцией разности времени  $t - \tau$ , т.е. соответствует некоторому «возрасту» течению времени, «старению грунта».

Таким образом для грунтов, имеющих свои физико-механические свойства во время сжатия, уравнение состояния неинвариантно относительно изменения начала отсчета времени, а ядро ползучести записывается с применением функций старения грунта  $\varphi(\tau)$ :

$$K(t, \tau) = \varphi(\tau) K_1(t, \tau) \quad (2)$$

При постоянном значении  $\sigma_i$  и  $\sigma$  формула деформации во времени (1) получает вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_i &= \frac{\sigma_i}{G_m} + \sigma_i \int_{\tau_1}^t K_\gamma(t, \tau) d\tau \\ \varepsilon_v &= \frac{\sigma}{K_m} + \sigma \int_{\tau_1}^t K_v(t, \tau) d\tau\end{aligned}\quad (3)$$

Если продифференцировать уравнение (3) относительно времени  $t$ , получим скорость деформации сдвига  $\dot{\varepsilon}_i$  и объема  $\dot{\varepsilon}_v$ :

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_i &= \sigma_i K_\gamma(t, \tau) \\ \dot{\varepsilon}_v &= \sigma K_v(t, \tau)\end{aligned}\quad (4)$$

Следовательно, при известных ядрах деформации сдвига  $K_v(t, \tau)$  и объема  $K_v(t, \tau)$  можно описать деформации ползучести глинистого грунта в



пространственном напряженном состоянии. Вид этих функций  $K_v(t, \tau)$  и  $K_v(t, \tau)$  можно определить путем эксперимента в лабораторных условиях испытанием образцов на одноосное или трехосное сжатие и на чистый сдвиг на срезном приборе или стабилометре. Если ввести функцию «старения глинистого грунта» во времени  $\varphi(\tau)$ , для уплотненной части глинистого слоя, тогда ядра ползучести  $K_v(t, \tau)$  и  $K_v(t, \tau)$  получат вид:

$$\begin{aligned} K_\gamma(t, \tau) &= \frac{1}{G_2} \varphi_\gamma(\tau) \{1 - \exp[-\delta_\gamma(t - \tau)]\} \\ K_v(t, \tau) &= \frac{1}{K_2} \varphi_v(\tau) \{1 - \exp[-\delta_v(t - \tau)]\} \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\delta_\gamma$  и  $\delta_v$  – экспериментальные постоянные параметры ядра ползучести, (единица измерения 1/с), определяемые испытанием образцов на компрессионном приборе и зависят от вида глинистого грунта.

Определяем значения  $\varphi_\gamma(\tau)$  и  $\varphi_v(\tau)$ :

$$\begin{aligned} \varphi_\gamma(\tau) &= \frac{1}{G_2} \{1 - \exp[-\delta_\gamma(t - \tau)]\} + \frac{1}{G_3(\tau / \tau_1)} \\ \varphi_v(\tau) &= \frac{1}{K_2} \{1 - \exp[-\delta_v(t - \tau)]\} + \frac{1}{K_3(\tau / \tau_1)} \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \frac{1}{G_3(\tau / \tau_1)} &= \alpha_\gamma \ln(\tau / \tau_1) \\ \frac{1}{K_3(\tau / \tau_1)} &= \alpha_v \ln(\tau / \tau_1) \end{aligned}$$

где  $G_2$  и  $G_3$  – модуль сдвига грунта в стадиях уплотнения.

Если, после отжатия или фильтрации и уплотнения, образцы влажной супеси ( $W=0,1$ ), поместить в компрессионный прибор и испытать при ступенчатой нагрузке  $P_i=0,0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4$  МПа, можно наблюдать процесс ползучести скелета грунта в упрощенном виде. Если упрощать все указанные уравнения наследственной ползучести и довести до применения в инженерной практике одномерного уплотнения в условиях компрессионного испытания, тогда можно описать эти процессы с помощью коэффициентов относительной сжимаемости образцов-близнецов при компрессионном испытании в направлении оси  $z$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_z(t) &= \sigma_z(t) m_{v1} - \int_{\tau_1}^t \frac{d\sigma_z(\tau)}{d\tau} m_v(t, \tau) d\tau \\ m_v(t, \tau) &= m_{v1} = m_{v2} e^{-\delta_k(t-\tau)} m_{v3}(\tau / \tau_1) \end{aligned} \quad (7)$$

где  $m_{v1}$  – коэффициент условно-мгновенного относительного сжатия;  $m_{v2}$  – коэффициент вторичного относительного сжатия, т.е. после второго уплотнения или «старения грунта»;  $m_{v3} = \alpha_k \ln(t/t_1)$  – после стабилизации

уплотнения грунтов, когда идет процесс ползучести скелета, а начинается этот процесс при  $m_{v2}$  в процессе уплотнения;  $\delta_k$  – параметр ползучести при компрессии;  $\alpha_k$ ,  $\tau_1$  – параметры уплотненной части грунта, так называемые параметры старения грунта (длительное время ползучести уплотненного грунта – старейшей грунтовой ползучести).

Технические характеристики образцов близнецов в природном состоянии:  
- удельный вес частиц  $\gamma_s=27,1$  кН/м<sup>3</sup>; удельный вес  $\gamma=20,5$  кН/м<sup>3</sup>; коэффициент пористости:

$$e_0 = \frac{\gamma_s}{\gamma}(1+w) - 1 = \frac{27,1}{20,5}(1+0,25) - 1 = 0,652$$

природная влажность  $w=0,25$ ; влажность на границе текучести  $w_L=0,118$ ; влажность на границе раскатывания  $w_p=0,064$ ; число пластичности  $I_p=w_L-w_p=0,118-0,064=0,054<0,07$  - этот грунт супесь. Степень влажности:

$$s_r = \frac{w\gamma_s}{e_0\gamma_w} = \frac{0,25 \cdot 27,1}{0,652 \cdot 10} = 1,039 > 1,0 - \text{грунт влажный.}$$

Показатель консистенции:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{0,25 - 0,064}{0,118 - 0,064} = 3,444 > 1,0 - \text{супесь текучая.}$$

Прочностные параметры в природном сложении: угол внутреннего трения  $\varphi=14^{\circ}30'$ ; сила сцепления  $C=0,0076$  МПа; условное расчетное давление  $R_0=0,12$  МПа. Данный грунт в природном сложении не пригоден для основания сооружений в любом виде.

После фильтрации при сжатии или отжатии поровой воды: влажность  $w=0,10$ ; коэффициент пористости  $e_0=0,454$ ; степень влажности  $s_r=0,597$ . Так как  $0,5 < s_r=0,597 < 0,8$  – супеси влажные.

Показатель консистенции:

$$I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} = \frac{0,10 - 0,064}{0,118 - 0,064} = 0,667 < 1,0 - \text{супесь пластичная.}$$

Условное расчетное давление  $R_0=0,30$  МПа, исходя из  $e_0=0,454<0,5$  и  $0<I_L=0,667<1,0$  по интерполяции между значениями  $I_L$  будем иметь  $R_0=0,30$  МПа, как при  $e_0=0,454$  и  $0<I_L<1,0$ .

Прочностные параметры: угол внутреннего трения  $\varphi=28^{\circ}00'$ ; сила сцепления  $C=0,0230$  МПа. Как видно после фильтрации происходило уплотнение скелета или «старение грунта» который можно испытать на ползучесть грунта в условиях компрессии. Значит, после фильтрации или отжатия поровой воды супеси при  $w=0,10$  пригодны для оснований сооружений, давление которых передается на основание, но не более расчетных давлений  $R_0 \leq 0,30$  МПа без дополнительных инженерных мероприятий. Все остальные показатели остаются неизменными на уровне природного сложения.

Для определения коэффициентов относительной сжимаемости  $m_v$ , в одометре (компрессионном приборе) испытываются образцы-близнецы супесей после фильтрации или отжатия поровой воды при  $W=0,1$ .

Образцы-близнецы из супеси высотой  $h_0=20\text{мм}$ , ( $h_0$  - высота кольца прибора, после фильтрации и уплотнения (старения) устанавливаем внутри компрессионного прибора и нагружаем ступенчатой нагрузкой  $P_i = 0,0; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,4$  МПа. При каждой ступени нагружения  $P_i$  после затухания деформаций фиксируем величины деформации образца грунта  $U_{Pi}$ , мм по индикаторам часового типа с делением 0,01, а затем вычисляем изменения коэффициента пористости  $e_{Pi}$  для различных ступеней нагрузки  $P_i$  по формуле:

$$e_{Pi} = e_0 - \frac{Y_{Pi}}{h_0} (1 + e_0)$$

И получаем:

$$\begin{aligned} e_{Pi=0} &= 0,454 - \frac{0,000}{20} (1 + 0,454) = 0,454 \\ e_{Pi=0,05} &= 0,454 - \frac{0,211}{20} (1 + 0,454) = 0,4387 \\ &\dots\dots\dots \\ e_{Pi=0,4} &= 0,454 - \frac{0,950}{20} (1 + 0,454) = 0,385 \end{aligned}$$

После построения компрессионных кривых для уплотненных (старейших) грунтов определяем значения коэффициентов сжимаемости для условно-мгновенного сжатия:

$$m_{0,1}^{MHa} = \frac{e_1 - e_2}{P_2 - P_1} = \frac{0,454 - 0,4387}{0,05 - 0,00} = 0,306 \quad -1$$

После уплотнения:

$$m_{0,2}^{MHa} = \frac{e_3 - e_5}{P_5 - P_3} = \frac{0,418 - 0,406}{0,20 - 0,10} = 0,122 \quad -1$$

После стабилизации уплотнения:

$$m_{0,3}^{MHa} = \frac{e_5 - e}{P_9 - P_5} = \frac{0,406 - 0,385}{0,40 - 0,20} = 0,105 \quad -1$$

Закон уплотнения для отрезков АВ будет:

$$de_{pi} = -tg\alpha dP_i = -m_{0,2} dP_i$$



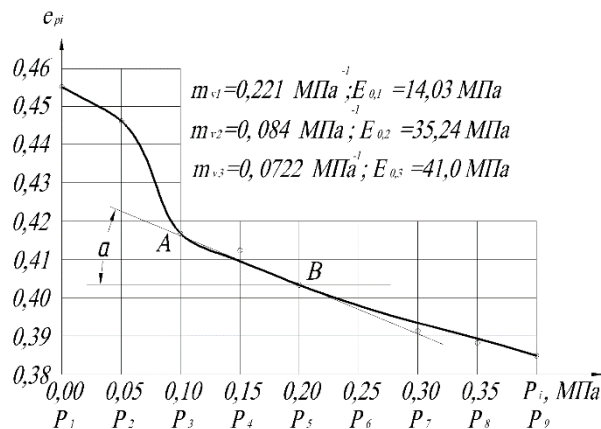


Рис. 2. Компрессионные кривые для супесей после отжатия поровой воды до  $W=0,1$  и уплотнения. Точка А – начало, точка В – конец отрезка уплотнения и начала стабилизации фильтрационной консолидации и ползучести скелета грунта

На поверхности компрессионной кривой принимаем характерные точки А и В. При минимальном наращивании ступенчатого давления при  $P_3=0,1$  и  $P_5=0,2$  МПа этот отрезок можно заменить прямой с углом к оси  $P$  равным  $\alpha$ .

$$m_{v1} = \frac{m_{0,1}}{1 + e_0} = \frac{0,306}{1 + 0,454} = 0,221 \text{ — условно-мгновенное время}$$

$$m_{v2} = \frac{m_{0,2}}{1 + e_0} = \frac{0,122}{1 + 0,454} = 0,084 \text{ — после уплотнения};$$

$$m_{v3} = \frac{m_{0,3}}{1 + e_0} = \frac{0,105}{1 + 0,454} = 0,0722 \text{ — после стабилизации деформаций},$$

которые имеют уменьшающий характер.

Тогда относительные коэффициенты сжимаемости определяем по формулам:

Модуль деформации при условно-мгновенном времени:

$$E_{0,1} = \frac{\beta \cdot m_k}{m_{v1}} = \frac{0,74 \cdot 4}{0,211} = 14,03$$

Модуль деформации после уплотнения:

$$E_{0,2} = \frac{\beta \cdot m_k}{m_{v2}} = \frac{0,74 \cdot 4}{0,084} = 35,24$$

Модуль деформации после стабилизации уплотнений:

$$E_{0,3} = \frac{\beta \cdot m_k}{m_{v3}} = \frac{0,74 \cdot 4}{0,0722} = 41,00$$

Здесь  $m_k=4$  для супесей;  $e_0=0,454 \leq 0,55$  — корректировочные коэффициенты, зависящие от величины  $e_0$ , следует принимать для суглинков  $e_0=0,45-0,55$ ,  $m_k=5$ , для глины  $0,65 < e_0 \leq 0,75$ ,  $m_k=5$ ;  $\beta=0,74$  — коэффициент учитывающий невозможности бокового расширения грунта супеси в

компрессионном приборе, его следует принимать: для песков  $\beta=0,8$ , для суглинков  $\beta=0,62$ , для глин  $\beta=0,4$ .

Таким образом, в простейшем случае уплотнение грунта в компрессионном приборе можно наблюдать наследственную ползучесть глинистого грунта имея следующие пять параметров:  $m_{v1}$ ,  $m_{v2}$ ,  $m_{v3}$ ,  $\tau$  и  $\delta_k$ , которые легко определяются по результатам компрессионных испытаний одного образца при ступенчатом нагружении. Здесь  $\tau$  – время,  $\delta_k$  – компрессионный параметр наследственной ползучести, определяется из кривой ползучести скелета (рис.3).

Кривая на рис.3 построена для определения реологических параметров скелета грунта  $m_{v1}$ ,  $m_{v2}$ ,  $m_{v3}$ ,  $\tau_1$  ( $t_f$  – время завершения консолидационной фильтрации).

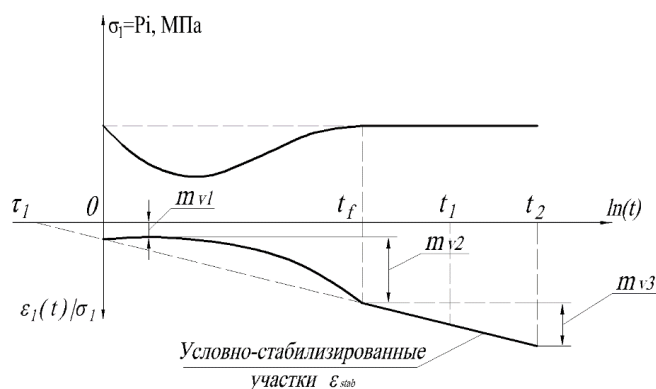


Рис. 3. Кривая ползучести скелета супеси после фильтрации до водонасыщенности  $W=0,1$  при компрессионном сжатии

Из рис. 3 видно, что  $m_{v1}$  определяется по условно-мгновенному возникновению  $\varepsilon_m$ . Относительный коэффициент сжимаемости  $m_{v2}$  – определяется по условно-стабилизированной деформации  $\varepsilon_{stab}$  с момента времени  $t_f$ :

$$m_{v1} = \frac{\varepsilon_m}{\sigma_1}$$

$$m_{v2} = \frac{\varepsilon_{stab} - \varepsilon_m}{\sigma_1} \quad (8)$$

Параметры  $m_{v3}$  и  $\tau$  определяются по зависимости:

$$\frac{\varepsilon_1(t)}{\sigma_1} - \ln t \quad (9)$$

Из рис.3 определяем:

$$\delta_k = \frac{\varepsilon_1(t_2) - \varepsilon_1(t_1)}{\sigma_1 \ln(t_2 / t_1)} \quad (10)$$

где  $t_2 > t_1 > t_f$ . Время ползучести скелета  $t_2 >$  времени уплотнения по условно-стабилизированным деформациям  $t_1 >$  времени завершения фильтрационной консолидации  $t_f$ . Значение  $\tau_1$  определяется как точка пересечения оси  $\ln t$  с прямой  $\varepsilon_1(t)/\sigma_1$  (см. рис.3). Как видно из рис. 3 реологическое уравнение

состояния для водонасыщенного глинистого грунта в нашем случае супеси, в целом связано с оценкой напряженно-деформированного состояния массива грунта в начальной стадии отжатия поровой воды, уплотнения и консолидации оставшейся поровой воды, а затем ползучести скелета.

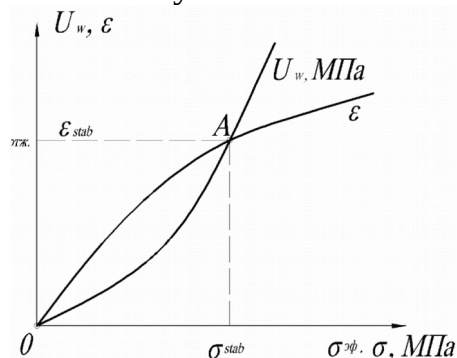


Рис. 4. Характерная зависимость порового давления  $U_w$  и объемной деформации  $\varepsilon$  от эффективного напряжения  $\sigma_{эф}$  и общего давления  $\sigma$  для частично отжатой поровой воды водонасыщенного грунта при отсутствии дренажа

Характерная зависимость нейтрального порового давления  $U_w$  и объемной деформации  $\varepsilon$  от эффективного давления (напряжения  $\sigma_{эф}$ ) и общего давления  $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$  для не полностью водонасыщенного грунта (или отжатой части поровой воды) при отсутствии дренажа (или в присутствии водоупора), приведена на рис. 4.

На рис.4 после точки А стабилизируется зависимость объемной деформации от давления, т.е. достигается  $\varepsilon_{stab}$  и проявляется наследственная ползучесть скелета грунта. Из рис. 4 видно, что консолидацию водонасыщенного глинистого грунта (на примере супеси) можно получить из уравнения постоянства массы поровой воды  $U_w$  и минеральных частиц (скелета грунта) в элементарном объеме в компрессионном сжатии в процессе отжатия поровой воды из водонасыщенного грунта.

Уравнение консолидации имеет вид:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = n \frac{\Delta \varepsilon_w}{\varepsilon_w} = \frac{K_f}{\gamma_w} \Delta U_w \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  и  $\varepsilon_w$  – объемные деформации грунта и поровой воды;  $n$  – пористость грунта;  $K_f$  – коэффициент фильтрации;  $\gamma_w = 10 \text{ кН/м}^3$  – удельный вес поровой воды;  $\Delta$ - оператор Лапласа;  $U_w$  - нейтральное поровое давление.

При отсутствии фильтрации, т.е. при  $K_f = 0$ , из уравнения (11) можно получить условие совместности деформации объема скелета  $\varepsilon$  и поровой воды  $\varepsilon_w$ . При несжимаемости поровой воды  $\varepsilon_w = 0$  и несжимаемости твердых частиц  $\varepsilon = 0$  в водонасыщенном грунте уравнение (11) характеризует решение задачи консолидации и ползучести водонасыщенного грунта.

## Выводы

1. Определены технические параметры после уплотнения и отжатия поровой воды (при влажном состоянии  $w=1,0$ , определены все изменяющиеся показатели и вычислены коэффициенты относительной сжимаемости условно-мгновенного времени  $m_{v1}$ , после уплотнения и стабилизации  $m_{v2}$ , при фильтрационной консолидации и ползучести  $m_{v3}$ . На основе этих коэффициентов сжимаемости составлены и решены уравнения наследственной ползучести.

2. Определены из зависимости нейтрального порового давления воды  $U_w$  и объемной деформации  $\epsilon$  от общего напряжения (давления)  $\sigma$  и от эффективного давлений  $\sigma_{эф}$  в точке «А», где после отжатия поровой воды возникает стабилизация зависимости между деформацией и напряжением, с которой начинается фильтрационная консолидация ( $U_w/\sigma$ ) и ползучесть скелета ( $\epsilon/\sigma$ ).

### Список используемых источников

1. Зарецький, Ю.К. В'язкопластичні ґрунти і розрахунки споруд [Текст] / Ю.К. Зарецький. - М.: Стройиздат, 1988. - 350 с.
2. Флорін, В.А. Основи механіки ґрунтів [Текст] / В.А. Флорін. - М. - Л.: Стройиздат, Т.1, 1959. - 357 с; Т.2, 1961. - 544 с.
3. Самедов, А.М. Розрахунок і проектування геотехнічних інженерних споруд (монографія) [Текст] / А.М. Самедов. – Київ, НТУУ «КПІ», 2013. - 806 с.
4. Шукле, Л. Реологические проблемы механики (сокращенный перевод с англ. Н.Н. Маслов, второе изд.) / Л. Шукле. - М.: Стройиздат, 1976. - 485 с.
5. Самедов, А.М. Розрахунок і проектування підземних споруд дрібного закладення (монографія) [Текст] / А.М. Самедов. - Київ, НТУУ «КПІ», 2013 р.
6. Самедов, А.М. Реологічні параметри перезволожених ґрунтів за теорією старіння [Текст] / А.М. Самедов, Д.В. Ткач // «Вісник НТУУ «КПІ»: зб. наук. праць. – К.: ВПК «Політехніка», 2014. – Вип. 25. – С. 20 – 27. – (Серія «Гірництво»).

*Статья поступила в редакцию 13.03.2016 г.*